



Kampweg 5
Postbus 23
3769 ZG Soesterberg

www.tno.nl

T +31 346 35 62 11
F +31 346 35 39 77
Info-DenV@tno.nl

TNO-rapport

TNO-DV 2008 A054

**Geluidsexpositie bij gebruik van CEP door
F-16 crewchiefs**

Datum	maart 2008
Auteur(s)	dr. ir. M.M.J. Houben J.A. Verhave F.W.M. Geurtsen
Rubricering rapport	Ongerubriceerd
Vastgesteld door	Y. Steinman
Vastgesteld d.d.	11 januari 2008 (Deze rubricering wijzigt niet)
Titel	Ongerubriceerd
Managementuittreksel	Ongerubriceerd
Samenvatting	Ongerubriceerd
Rapporttekst	Ongerubriceerd
Bijlage	Ongerubriceerd
Exemplaarnummer	7
Oplage	15
Aantal pagina's	28 (incl. bijlage, excl. RDP & distributielijst)
Aantal bijlagen	1

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht van het ministerie van Defensie werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van de opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de 'Modelvoorwaarden voor Onderzoeks- en Ontwikkelingsopdrachten' (MVDT 1997) tussen de minister van Defensie en TNO indien deze op de opdracht van toepassing zijn verklaard dan wel de betreffende ter zake tussen partijen gesloten overeenkomst.

© 2008 TNO

AQ F08-08-05906

20080507054

Geluidsexpositie bij gebruik van CEP door F-16 crewchiefs



Probleemstelling

Bij de krijgsmacht, in het bijzonder bij de Koninklijke Luchtmacht, wordt in toenemende mate gebruikgemaakt van communications earplugs (CEPs). Dit zijn oordoppen waarin een miniatuuoroortelefoon is geïntegreerd, waardoor radio- en intercomgeluiden ongedempt aan de gebruiker kunnen worden aangeboden terwijl de oordoppen wél het omgevingsgeluid verzwakken. Om de kans op gehoorschade te beperken is het van belang inzicht te krijgen in de mate van blootstelling aan schadelijke geluiden. Om na te kunnen gaan of aan de vereisten van de Arbo-wet met betrekking tot de maximale geluidsexpositie van personeel wordt voldaan kan niet worden volstaan met standaarddosismetingen van het omgevingsgeluid. De communicatie via de oortelefoon van de CEP draagt namelijk

ook bij aan de totale dosis. Daarom heeft TNO Defensie en Veiligheid in opdracht van het Centrum voor Mens en Luchtvaart van de Koninklijke Luchtmacht een methodiek ontwikkeld om geluidsexpositiemetingen uit te voeren bij gebruik van CEPs. Deze is toegepast tijdens werkzaamheden van F-16 crewchiefs op Vliegbasis Volkel, een populatie die de CEP intensief gebruikt onder extreme lawaaiomstandigheden.

Beschrijving van de werkzaamheden

Tijdens werkzaamheden van enkele F-16 crewchiefs zijn zowel het omgevingslawaai als het elektrische signaal naar de CEP opgenomen. In het laboratorium van TNO is voor hetzelfde type CEP bepaald wat de relatie is tussen het elektrische niveau naar de CEP en het ervaren geluidniveau. Hiertoe kregen luisteraars afgewisseld een

geluid via CEP te horen in het ene oor en een geluid van buiten via het andere open oor en moesten ze deze zo instellen dat ze even luid klonken. Met behulp van deze relatie zijn voor de opnamen de geluidniveaus ten gevolge van de communicatie via CEP bepaald. Door deze samen te voegen met de niveaus van het buitenlawaai (na verzwakking door de gehoorbescherming) werd de totale geluidbelasting verkregen.

Resultaten en conclusies

De communicatie via CEP levert een belangrijke bijdrage aan de totale geluidsexpositie van F-16 crewchiefs. Bij onze opnamen op Vliegbasis Volkel is deze gemiddeld bijna 3 dB hoger dan de geluidsexpositie als gevolg van het omgevingslawaai. De geschatte totale dagdosis bij het twee keer op een dag afhandelen van vertrek en aankomst van een F-16 is 79 dB(A). De maximaal toegestane dagdosis van 80 dB(A) wordt dan net niet overschreden.

Toepasbaarheid

Met behulp van de ontwikkelde methodiek kunnen ook geluidsexpositiemetingen worden uitgevoerd bij andere populaties CEP-gebruikers.

PROGRAMMA	PROJECT
Programmabegeleider -	Projectbegeleider Y. Steinman, Mindef/DS/CLSK/CML
Programmaleider -	Projectleider dr. ir. M.M.J. Houben, TNO Defensie en Veiligheid
Programmatitel -	Projecttitel Geluidsexpositie ten gevolge van Communications Earplugs
Programmanummer -	Projectnummer 032.13072
Programmaplanning -	Projectplanning Start 15 januari 2007 Gereed 31 maart 2008
Frequentie van overleg Met de projectbegeleider werd vier maal gesproken over de invulling en de voortgang van het onderzoek.	Projectteam dr. ir. M.M.J. Houben J.A. Verhave F.W.M. Geurtsen J.C.M. von Schmid

Contact en rapportinformatie

Kampweg 5
 Postbus 23
 3769 ZG Soesterberg

T +31 346 35 62 11
 F +31 346 35 39 77

Info-DenV@tno.nl

TNO-rapportnummer
 TNO-DV 2008 A054

Opdrachtnummer
 -

Datum
 maart 2008

Auteur(s)
 dr. ir. M.M.J. Houben
 J.A. Verhave
 F.W.M. Geurtsen

Rubricering rapport
 Ongerubriceerd

Summary

Sound exposure level of F-16 crew chiefs using communications earplugs.

For communication in noisy environments, communications earplugs (CEPs) are increasingly used. CEPs are earplugs that incorporate a miniature speaker through which communication can be presented to the user unattenuated while the earplugs do attenuate environmental sounds.

To assess the sound exposure level of CEP users, not only environmental sounds should be taken into account, but also the sound exposure resulting from communication through the CEP.

For this, a measurement method has been developed. It uses loudness matching to establish the relation between electric level to the CEP and perceived sound level. During activities, both the environmental noise and the electric signal to the CEP are recorded. The level of the environmental sounds, after attenuation by the hearing protection, is combined with the sound level produced by the CEP, which is determined from the electric level.

This method is applied to F-16 crew chiefs at Air Base Volkel, a population that uses CEPs extensively in extremely noisy conditions. Our calculations show that communication through CEP significantly contributes to the sound exposure level of the crew chiefs. The estimated day dose, based on two launches and recoveries, is 79 dB(A), which is just below the maximum allowed level of 80 dB(A).

Inhoudsopgave

	Managementuittreksel	2
	Summary	4
1	Inleiding.....	6
2	Achtergrond	7
3	Kalibratiemetingen	9
3.1	Inleiding	9
3.2	Drempelmetingen	9
3.3	Loudness matching	9
3.4	Resultaten	11
4	Geluidverzwakking gehoorbescherming	13
4.1	Inleiding	13
4.2	Methode.....	13
4.3	Resultaten	13
5	Dosismetingen	15
5.1	Inleiding	15
5.2	Opname apparatuur.....	15
5.3	Procedure.....	16
5.4	Registraties	17
6	Dosisberekeningen	18
6.1	Rekenmethode	18
6.2	Resultaten	19
6.3	Simulatie.....	21
7	Discussie en conclusie	22
8	Referenties.....	24
9	Ondertekening	25
	Bijlage	
	A Simulatie	

1 Inleiding

Bij de krijgsmacht, in het bijzonder bij de Koninklijke Luchtmacht, wordt in toenemende mate gebruik gemaakt van zogenaamde 'communications earplugs', ofwel CEPs. Dit zijn oordoppen waarin een miniaturoortelefoon is geïntegreerd, waardoor radio- en intercomgeluiden ongedempt aan de gebruiker kunnen worden aangeboden terwijl de oordoppen wél het omgevingsgeluid verzwakken. De Arbo-wet stelt eisen aan de maximale geluidsexpositie van personeel: er mag niet teveel (en te lang) geluid worden aangeboden. Het bepalen van geluidsexpositie gebeurt veelal met standaardtechnieken, zoals lawaai-dosimeters en door middel van rekentechnieken op basis van bekende geluidverzwakkingswaarden. Echter, bij gebruik van CEPs is de geluidsexpositie niet zonder meer te bepalen.

Om na te kunnen gaan of aan de vereisten van de arbowet wordt voldaan moet men de lawaai-expositie van personeel bij gebruik van CEPs kunnen monitoren. Vooral bij de F-16 crewchiefs op Vliegbasis Volkel, een populatie die de CEP intensief gebruikt onder extreme lawaaiomstandigheden, is het noodzakelijk inzicht te krijgen in de mate van blootstelling aan schadelijke geluiden. Dit rapport beschrijft een methodiek om geluids-expositiemetingen uit te voeren bij gebruik van CEPs. Ook worden de resultaten gepresenteerd van het toepassen van deze methodiek om inzicht te krijgen van de geluidsexpositie van F-16 crewchiefs op Vliegbasis Volkel.

2 Achtergrond

Het meten van de totale geluidsexpositie *wanneer geen gehoorbescherming wordt toegepast* is relatief eenvoudig: conform de toepasselijke normen (en wettelijke voorschriften) wordt gedurende een werkdag, of gedurende een specifieke activiteit, het geluidniveau nabij het hoofd (bij de schouder op oor hoogte) van een betreffende medewerker gemeten. Hieruit wordt een zogenaamd A-gewogen equivalent geluidniveau berekend, dat rechtstreeks kan worden vergeleken met tabelwaarden uit normen. In de handel verkrijgbare apparatuur (dosimeters) voeren de benodigde metingen en berekening geautomatiseerd uit: een betreffende medewerker krijgt het apparaat mee, waarna de meetwaarden achteraf worden uitgelezen.

Bij gebruik van conventionele gehoorbeschermingsmiddelen, zoals 'normale' oordoppen en oorkappen, wordt de situatie iets complexer. De meest betrouwbare methode om het geluidsexpositieniveau (de 'dagdosis') te bepalen komt neer op het toepassen van een rekenkundige correctie op eerder genoemde dosismetwaarden: de geluidverzwakking van de gebruikte gehoorbeschermers, die uiteraard nauwkeurig bekend moet zijn, wordt in de dosismetwaarden verwerkt. Overigens is bij gelijktijdig gebruik van oordoppen en oorkappen de totale geluidverzwakking niet simpelweg het totaal van de afzonderlijke dempingen. Door beengleiding via de schedel is de gezamenlijke verzwakking altijd minder dan de som van de afzonderlijke verzwakkingen van dop en kap¹.

Bij gebruik van CEPs werkt deze aanpak niet, omdat niet alleen het omgevingsgeluid bijdraagt aan de totale dosis, maar ook de communicatie via de oortelefoon in de oordoppen. Uit onderzoek blijkt dat de bijdrage van radio en intercom aan de totale geluidbelasting de dominante factor is. Deze bijdrage is in de praktijk veelal hoger dan de bijdrage van het omgevingsgeluid. De oorzaak is simpel: om te allen tijde gegarandeerd te zijn van een optimale verstaanbaarheid van de communicatie kiest men voor een geluidniveau dat luider is dan het waargenomen omgevingsgeluid.

In theorie kan het totale geluidsexpositieniveau worden bepaald door het geluidniveau te meten *achter* de oordop, in de gehoorgang. Dit stuit echter op een aantal bezwaren. Hoewel inmiddels miniatuurmicrofoons beschikbaar zijn waardoor dergelijke metingen technisch mogelijk zijn, zijn ze te onpraktisch om daadwerkelijk te kunnen worden toegepast in langdurige dosismetingen; hiervoor is deze aanpak te kwetsbaar en oncomfortabel. Een extra moeilijkheid bij het meten is de aanwezigheid van cerumen dat op het uiteinde van de microfoon terecht kan komen. Ook is het geluidniveau dat wordt gemeten in de gehoorgang afhankelijk van de positie van de microfoon en van de specifieke geometrie en impedantie van de gehoorgang en het middenoor van degene waarbij wordt gemeten. Bovendien komt het geluidniveau gemeten in een open gehoorgang niet overeen met het geluidniveau in het vrije veld, wat geldt als referentie voor het bepalen van de lawaai-belasting. De uitwendige gehoorgang beïnvloedt namelijk in sterke mate de open-oor responsie. Door opslingeren in het oor kan 80 dB(A) buiten bijvoorbeeld een niveau van 88 dB(A) in de gehoorgang geven. Daarbij zal het geluidniveau in een afgesloten gehoorgang niet overeen komen met die in een open gehoorgang.

¹ In sommige uitzonderlijke gevallen kan door resonanties de verzwakking van de gecombineerde gehoorbescherming zelfs lager zijn dan de beste gehoorbescherming afzonderlijk.

Daarom is er gekozen voor een andere aanpak. Het geluid geproduceerd door een CEP in het oor van een luisteraar werd door deze luisteraar zo ingesteld dat het even luid klinkt als een geluid dat via het andere open oor is te horen. Doordat het geluidniveau van het via open oor aangeboden geluid bekend is en het elektrische niveau naar de CEP wordt opgenomen, is te bepalen met welk geluidniveau in het vrije veld het elektrische signaal naar de CEP overeenkomt. Vanwege verschillende gevoeligheden voor verschillende type CEPs is deze vertaling van elektrisch niveau naar equivalent geluidniveau specifiek voor het onderzochte type CEP. Echter, omrekening naar een ander type CEP is relatief eenvoudig omdat dit op basis van akoestische metingen aan een kunstoor kan gebeuren.

Met behulp van deze procedure zijn in het laboratorium van TNO voor het CEP-type dat door F-16 crewchiefs op Vliegbasis Volkel wordt gebruikt (Standard CEP, CEP199-C01, Communications & Earprotection Inc, www.cep-usa.com) kalibratiegegevens verzameld (hoofdstuk 3). Ook zijn de geluidverzwakkingswaarden voor de combinatie van gebruikte headset en CEP bepaald (hoofdstuk 4). Vervolgens zijn er dosismetingen uitgevoerd bij F-16 crewchiefs op de Vliegbasis Volkel, waarbij zowel het geluidniveau op de schouder als het communicatiesignaal naar de CEP werd gemeten (hoofdstuk 5). Het geluidsexpositieniveau kon nu bepaald worden door het buitenniveau te verminderen met de verzwakking door de gehoorbescherming en hierbij de geluidbelasting ten gevolge van de communicatie via de CEP op te tellen (hoofdstuk 6).

3 Kalibratiemetingen

3.1 Inleiding

Om te bepalen wat de geluidbelasting is van de communicatie via de CEP moeten we weten met welk vrije veld geluidniveau een elektrisch niveau aangeboden via de CEP overeenkomt. Om dit verband te kunnen leggen maken we gebruik van 'loudness matching'. Hierbij maakt een luisteraar het geluid (smalbandige ruis) geproduceerd door de CEP in het ene oor even luid als het waargenomen geluid van een externe geluidsbron in het andere, open, oor. Dit levert een relatie op tussen het via CEP aangeboden geluidsignaal (in dB Volt) en open oor equivalent vrije veld niveau (in dB SPL).

3.2 Drempelmetingen

Om de geschiktheid van de proefpersonen te testen werd bij iedere proefpersoon eerst de gehoordrempel van elk oor gecontroleerd. Het te testen oor was open, het contralaterale oor werd afgesloten door een combinatie van oorplug en oorkap – de testgeluiden werden dus monotisch aangeboden. De meting werd herhaald met het andere oor open.



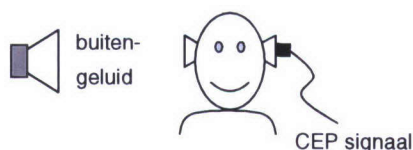
Figuur 1 Schematische weergave drempelmetingen.

Voor het vinden van de gehoordrempels werd gebruik gemaakt van het paradigma van Békésy. Hierbij wordt het geluid harder of zachter aangeboden al naar gelang de luisteraar een knop indrukt omdat het geluid wordt gehoord of deze loslaat omdat het geluid onhoorbaar is geworden. De gehoordrempel van de luisteraar zit tussen het punt van indrukken en het punt van loslaten van de knop. Zo worden er tien omkeerpunten gemeten en als gehoordrempel wordt het gemiddelde van de laatste zes omkeerpunten genomen. Dit werd gedaan voor zeven roze-ruisbandjes, 1/3 octaaf breed en middenfrequentie 1 octaaf uit elkaar. De volgorde van de tertsbanden was willekeurig. De meting is voor iedere proefpersoon per oor drie keer uitgevoerd. De metingen werden verricht in een ruimte met variabele akoestiek (galmkamer) waarin een diffuus geluidsveld werd gecreëerd (ISO 4869, 16 absorbers, nagalmtijd 0,6 s). De proefpersoon zat op een stoel in het homogene diffuse geluidsveld.

Tien van de 13 geteste proefpersonen hadden een normaal en symmetrisch gehoor. De resultaten van deze 10 proefpersonen zijn meegenomen in de analyses.

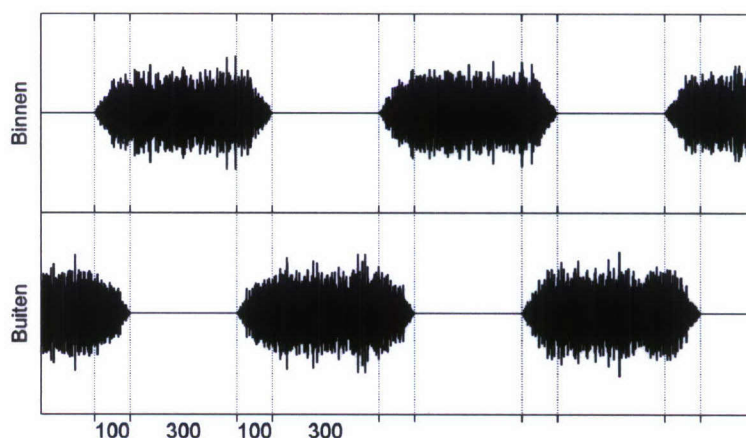
3.3 Loudness matching

De overdracht van de CEP, van elektrisch niveau naar akoestisch equivalent vrije veld geluidniveau, werd bepaald door de proefpersonen het geluid aangeboden via CEP in het ene oor even luid te laten maken als het geluid van buiten via het andere, open, oor.



Figuur 2 Schematische weergave loudness matching meting.

Wederom werd smalbandige roze ruis gebruikt, 1/3 octaaf breed, de middenfrequenties 1 octaaf gescheiden. De volgorde van de tertsbanden was uitgebalanceerd. De geluiden werden gepulseerd aangeboden, het CEP-sigitaal en het geluid buiten alternerend, met 100 ms in- en uitgeklonken overlap en een totale periodeduur (geluid 1 + geluid 2) van 800 ms, zie figuur 3. Als gevolg hiervan kwam de ruis afwisselend uit de CEP in het ene oor en van buiten via het andere oor. De luisteraar kon met behulp van twee knoppen het geluid via de CEP luider of minder luid maken (het gepulste geluidniveau buiten bleef constant), net zolang totdat hij of zij vond dat de geluiden in beide oren even luid waren. Door een verschil in klankkleur en de aanwezigheid van (beperkte) galm in het buitengeluid, klonken de geluidbronnen niet hetzelfde. Bovendien werd er een vergelijking gemaakt tussen een diffuus geluid buiten en een direct geluid via CEP, en werden de geluiden monotisch aangeboden (afwisselend in het ene en het ander oor) in plaats van dichotisch (beide oren tegelijk hetzelfde geluid) zoals men gewend is te luisteren. Daarom werd de meting drie keer uitgevoerd met de CEP in het ene oor en drie keer met de CEP in het andere oor en werd er gemiddeld over de herhalingen².



Figuur 3 Voorbeeld van een gedeelte van de signalen die gebruikt zijn bij de loudness matching meting. Het geluid binnen (CEP-sigitaal) is aan als het geluid buiten uit is en omgekeerd, met een in- en uitgeklonken overlap van 100 ms. De periode van stilte is 300 ms.

Een RME Hammerfall geluidskaart werd gebruikt om de signalen af te spelen. Vanwege veiligheidsredenen werd het ingangssigitaal naar de CEP beperkt door het plaatsen van een weerstand voor de CEP. Dit om zeker te stellen dat, mocht er iets fout gaan met de aansturing van het experiment, het geproduceerde akoestische vermogen van de CEP binnen veilige grenzen bleef. Het elektrische sigitaal naar de CEP werd ook opgenomen. Een tweede input sigitaal was het akoestische sigitaal gemeten in de kamer,

² Vanwege de aard van het experiment is het denkbaar dat luisteraars moeten wennen aan de taak en dus het niveau van de CEP tijdens de eerste meting anders instellen dan tijdens de andere metingen. Echter, als we om dit te testen de eerste meting niet meenemen in de analyse dan heeft dat nauwelijks invloed op het resultaat. Blijkbaar is er ondanks de moeilijkheid van de taak geen significant leereffect van de eerste naar de volgende metingen. We hebben dan ook alle metingen meegenomen in onze analyse.

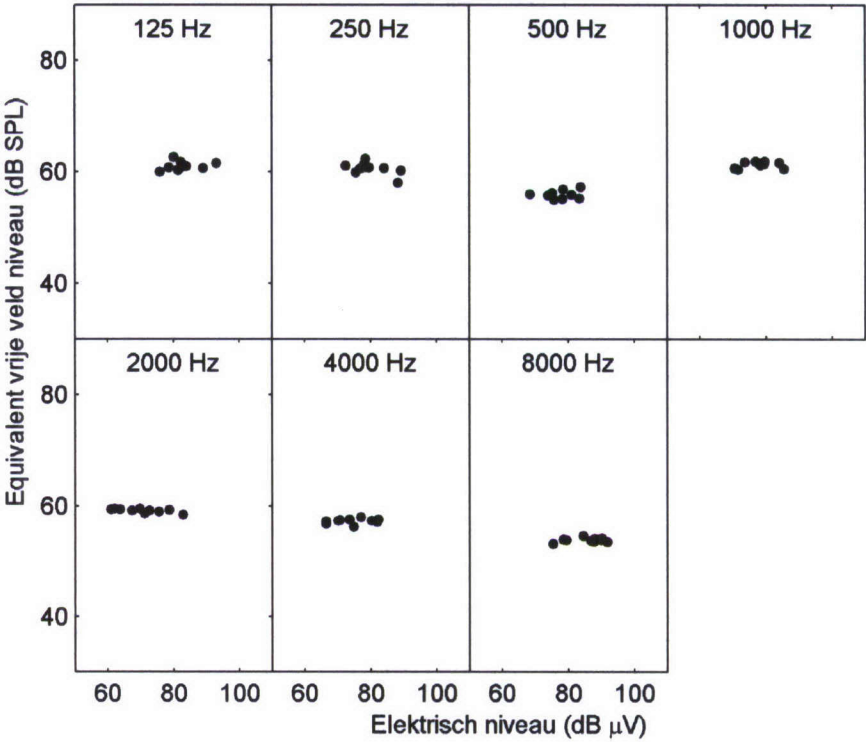
dicht bij de proefpersoon en op oorhoogte (B&K 2237). Een opname met een calibrator werd als referentie gebruikt om het elektrische signaal om te rekenen naar akoestische waarden. De signalen werden bandgefilterd met een bandbreedte van een octaaf en middenfrequentie gelijk aan die van de gebruikte stimulus (welke, zoals eerder vermeld, een bandbreedte heeft van 1/3 octaaf)³. Het maximum niveau, gemiddeld over 300 ms, van de laatste 1,2 seconde van de opgenomen signalen werd genomen als ingestelde en afgespeelde niveaus van de CEP (dB μ V) en het buitenveld (dB SPL).

3.4 Resultaten

In figuur 4 staat, per frequentieband, het equivalent vrije veld niveau (dB SPL) uitgezet tegen het elektrische input niveau naar de CEP (dB μ V) dat als even luid wordt beoordeeld. Elk punt geeft het resultaat van een proefpersoon weer, gemiddeld over de herhaalde metingen. Er is te zien dat de spreiding in ingestelde CEP niveau over proefpersonen erg groot is. Dit kan verschillende oorzaken hebben. Ten eerste kunnen proefpersonen de luidheid anders beoordelen. Ten tweede kan het werkelijk geproduceerde geluidsniveau door de CEP variëren door verschillen in gehoorgang en middenoor, versterkt door proefpersoonafhankelijke plaatsing van de dop. Vanwege deze individuele effecten wordt er gebruik gemaakt van gemiddelden en standaarddeviaties.

De correctiefactor om van elektrisch niveau naar geluidsniveau te gaan is simpelweg de waarde op de verticale as minus de waarde op de horizontale as. In tabel 1 staan de gemiddelde resultaten (dB) en standaarddeviaties (dB) over proefpersonen. Om bij de berekeningen van de geluidsexpositie veilig te zitten nemen we daar als correctiefactor niet de gemiddelden, maar de gemiddelden plus één maal de standaarddeviatie. Dat betekent dat bij een bepaald elektrisch niveau op de CEP, bij 84% van de gebruikers dit overeenkomt met een geluidsniveau lager dan of gelijk aan het geschatte geluidsniveau.

³ Omdat de aanwezigheid, maar ongewenste, achtergrondruis zeer laagfrequent was, geeft een hoogdoorlaatfilter met afsnijfrequentie van 100 Hz nagenoeg identieke resultaten.



Figuur 4 Het equivalent vrije veld niveau (dB SPL) uitgezet tegen het door de proefpersonen ingestelde elektrische niveau naar de CEP (dB µV), per frequentieband. Elk punt is een proefpersoon, gemiddeld over de herhaalde metingen.

Tabel 1 Relatie tussen het via CEP aangeboden geluidsignaal (in dB µV) en open oor equivalent vrije veld niveau (in dB SPL). Van de correctiefactoren (in dB) worden per octaafband het gemiddelde, de standaarddeviatie en het gemiddelde plus één keer de standaarddeviatie gegeven.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
gemiddelde	-21,9	-19,5	-21,4	-16,4	-11,3	-17,0	-31,4
std	4,9	6,1	4,7	4,8	7,5	5,9	5,6
gemiddelde + std	-17,0	-13,4	-16,7	-11,6	-3,8	-11,1	-25,8

4 Geluidverzwakking gehoorbescherming

4.1 Inleiding

Om te kunnen bepalen wat de bijdrage van het omgevingslawaai is aan de geluidbelasting, moet het gemeten buitenniveau worden verminderd met de demping van het geluid door de gebruikte gehoorbescherming. De gehoorbescherming is een combinatie van headset en CEP-dop. De meeste crewchiefs op vliegbasis Volkel gebruiken een Astrocom headset. Hoewel er separate verzwakkingswaarden beschikbaar zijn voor de Astrocom headset [2] en voor de CEP [4], is de gecombineerde verzwakking niet bekend⁴. Het is mogelijk om de totale globale verzwakking (zoals de ENR, *Estimated Noise Rating*) te schatten [5]. Echter, omdat de verzwakking als functie van frequentie niet vlak zal zijn, is het nauwkeuriger om de verzwakking per frequentieband te gebruiken.

4.2 Methode

De verzwakking van de combinatie van Astrocom headset en CEP oordop is bepaald met de REAT-methode (*Real Ear At Threshold*) [3]. Het verschil tussen de gehoordrempel met en zonder gehoorbescherming geeft de individuele geluidverzwakking van de gemeten (dubbele) gehoorbescherming. De meting is gelijk aan die beschreven in paragraaf 3.2. De metingen werden verricht bij 9 normaalhorende proefpersonen. Er werd een standaard of dun schuimstukje gebruikt voor de CEP, afhankelijk van wat het beste paste bij elke individuele proefpersoon. De oorkappen van de Astrocom headset waren uitgerust met foam oorkussens.

4.3 Resultaten

De gemiddelde geluidverzwakking en standaarddeviatie per frequentieband worden gegeven in tabel 2. De standaarddeviaties bij de laagste frequenties zijn relatief groot. Wellicht paste de headset niet in alle gevallen optimaal of lekte de headset doordat de draden van de CEPs langs de kussens de oorkappen verlaat. Dit is mogelijk in de praktijk ook het geval. In de dosisberekeningen (hoofdstuk 6) zijn, zoals gebruikelijk, de APV-waarden (*Assumed Protection Value*) gebruikt. Dit is de gemiddelde verzwakking minus één keer de standaarddeviatie en geeft de veronderstelde minimale verzwakking voor 84% van de populatie. De APV-waarden staan in de onderste rij van tabel 2. Voor de volledigheid worden in tabel 3 de door ons gemeten geluidverzwakkingen voor alleen de CEP gegeven. Opvallend is dat voor de laagste frequenties de gecombineerde verzwakking van CEP en Astrocom minder is dan de verzwakking van alleen de CEP. Een mogelijke oorzaak is, gezien de hoge standaard deviatie bij de laagste frequenties, dat de Astrocom niet voor alle proefpersonen geheel afsluit. Het effect van het combineren van een kap en dop is dus niet zonder meer te berekenen uit de afzonderlijke verzwakkingen of, zoals ook wel eens wordt gedaan, door de verzwakking van de dop te nemen plus 5 dB.

⁴ De totale verzwakking van het gelijktijdig dragen van oorkappen en -doppen is niet simpelweg de som van de afzonderlijke verzwakkingen. Beengleiding van het geluid via de schedel limiteert de gezamenlijke verzwakking waardoor deze lager is dan de som van de afzonderlijke verzwakkingen.

Tabel 2 Gemiddelde geluidverzwakking en standaarddeviatie in dB voor de verschillende octaafbanden voor de combinatie van Astrocom headset met CEP. De APV, *Assumed Protection Value*, is gelijk aan de gemiddelde verzwakking min de standaarddeviatie.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
gemiddelde	22,0	27,5	35,2	35,2	39,7	45,5	44,5
std	7,1	8,8	5,1	4,1	5,6	4,4	2,7
APV	14,9	18,8	30,0	31,1	34,1	41,1	41,7

Tabel 3 Gemiddelde geluidverzwakking, standaarddeviatie en APV, allemaal in dB, voor de verschillende octaafbanden bij gebruik van enkelvoudige gehoorbescherming door de CEP.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
gemiddelde	24,8	23,6	23,5	24,6	31,9	34,9	35,4
std	5,4	7,3	7,3	6,7	4,4	5,3	6,3
APV	19,4	16,4	16,2	17,9	27,4	29,6	29,1

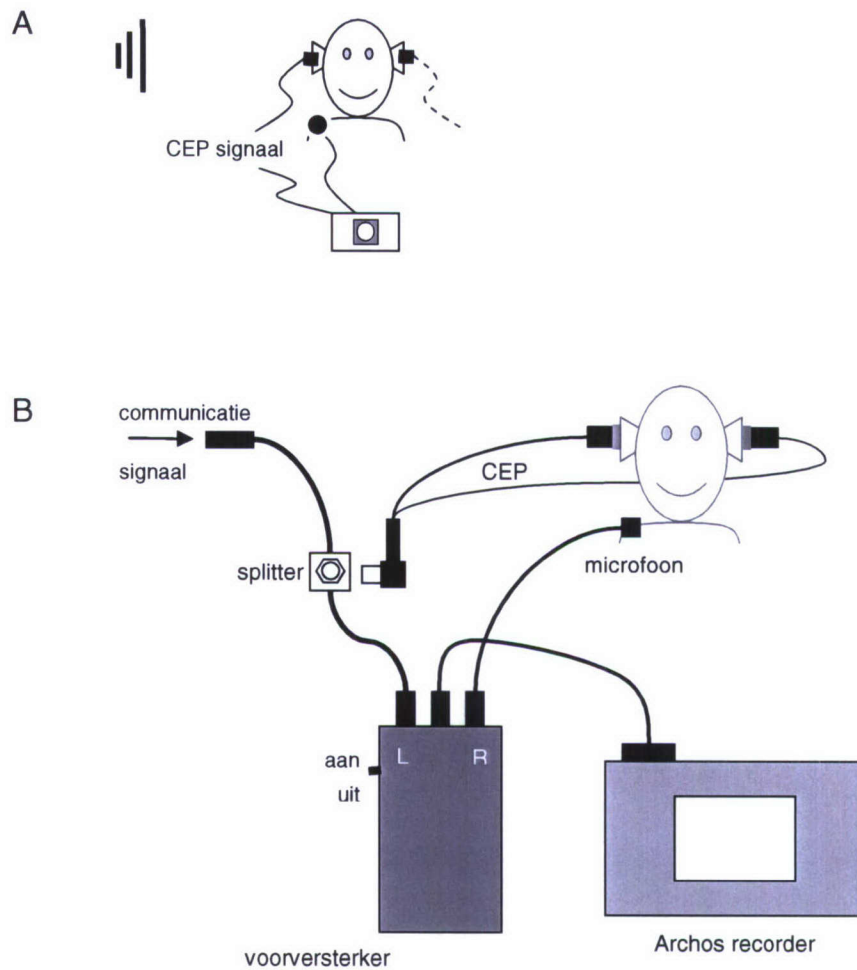
5 Dosismetingen

5.1 Inleiding

Met behulp van de door de labmetingen verkregen relatie tussen het signaal aangeboden via de CEP en het ervaren geluidniveau kan de geluidbelasting ten gevolge van communicatie via de CEP worden bepaald. Door deze op te tellen bij de belasting ten gevolge van omgevingslawaai, kan de totale geluidsexpositie van CEP-gebruikers worden bepaald. Om inzicht te krijgen in de geluidsexpositie van F16 crewchiefs op Vliegbasis Volkel, zijn er aldaar geluidsopnamen gemaakt tijdens dagelijkse werkzaamheden. Zowel het omgevingslawaai als de communicatie via CEP werden opgenomen met behulp van een harddiskrecorder (zie ook [1]). De totale geluidsdosis werd achteraf (na analyse in het lab) vastgesteld.

5.2 Opname apparatuur

De opnamen van de twee kanalen werden opgeslagen op een Archos Gmini 402 harddiskrecorder (met een opslagcapaciteit van 20 GB) met een samplefrequentie van 44,1 kHz en 16-bit resolutie. Voor de opname van het omgevingslawaai werd een Sennheiser KE-4 microfoon gebruikt. Het signaal werd versterkt met behulp van een custom-built voorversterker welke werd aangesloten op de line-input van de Archos. Het elektrische signaal naar de CEP werd afgetakt en via een tweede kanaal van de voorversterker op de Archos aangesloten (zie figuur 5). De gevoeligheid van elk voorversterkerkanaal werd zodanig afgeregeld dat het signaal zo sterk mogelijk was bij minimale kans op oversturing.



Figuur 5 Schematische weergave van de dosismetingen (A) en gebruikte apparatuur (B).

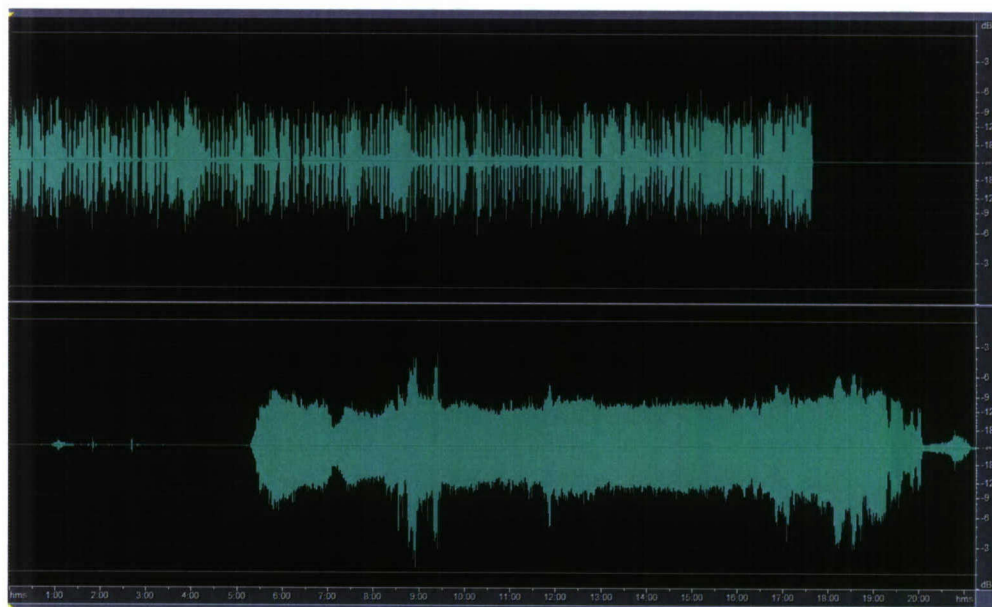
5.3 Procedure

De crewchief droeg de harddiskrecorder en voorversterker in de borstzak. De microfoon was bevestigd op de schouder. Er werd een eigen CEP-set gebruikt van hetzelfde type als gebruikt bij de metingen in het laboratorium (beschreven in hoofdstuk 4). Het enige verschil met normaal gebruik was dat de CEP via een splitter werd aangesloten op de helm in plaats van rechtstreeks. Alle crewchiefs die deelnamen aan de metingen gebruikten een Astrocom headset.

Er werd gedurende meerdere dagen met twee meetsets metingen verricht. Vlak voor een F-16 *launch* of *recovery* werd de apparatuur aangezet en de opname gestart. Gedurende de werkzaamheden werden opnamen gemaakt en opgeslagen in een enkel bestand per launch of recovery. Voor analyse en dosisberekeningen werden deze bestanden overgezet naar een PC. Er is bij 4 verschillende crewchiefs gemeten over meerdere dagen.

5.4 Registraties

Figuur 6 laat een voorbeeld zien van een opname gedurende een launch. Er is te zien dat de communicatie begint voor het opstarten van de F-16. Aan het einde van de opname is de communicatie via spraak gestopt terwijl de F-16 uit de shelter rijdt en de laatste controles worden uitgevoerd.



Figuur 6 Voorbeeld van een opname bij een crewchief tijdens de launch van een F-16. Het bovenste signaal is de communicatie via CEP, het onderste signaal het omgevingslawaaï opgenomen met de Sennheiser KE-4 microfoon. De y-assen zijn in arbitraire eenheden.

In totaal zijn er tijdens 9 launches en 6 recoveries geluidopnamen gemaakt. Tabel 4 geeft een overzicht van de registraties. De duur van de bezigheden in (extreem) lawaaiige omstandigheden is gemiddeld ongeveer 15 minuten per launch en 3,5 minuten per recovery.

Tabel 4 Overzicht van de geluidopnamen bij F-16 crewchiefs op Vliegbasis Volkel. De duur is niet de opnameduur maar de duur van activiteiten in lawaaiige omgeving (F-16 met draaiende motor en/of communicatie via CEP).

Label	Crewchief	Meetset	Launch/Recovery	Duur (min'sec)
L1	1	A	Launch	18'56
L2	1	A	Launch	13'20
L3	1	A	Launch	21'13
L4	2	A	Launch	13'12
L5	3	B	Launch	15'21
L6	3	B	Launch	14'23
L7	3	B	Launch	13'59
L8	4	B	Launch	11'54
L9	4	B	Launch	14'24
R1	1	A	Recovery	3'23
R2	1	A	Recovery	3'21
R3	1	A	Recovery	3'06
R4	2	A	Recovery	3'09
R5	3	B	Recovery	4'06
R6	3	B	Recovery	3'34

6 Dosisberekeningen

6.1 Rekenmethode

Alle berekeningen zijn uitgevoerd in 7 octaafbanden met middenfrequenties 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 en 8000 Hz. Om aan de hand van de dosismetingen te komen tot het geluidsexpositieniveau, moeten een aantal stappen worden doorlopen.

IJking

Allereerst moeten de opgenomen microfoon- en communicatiesignalen worden vertaald naar respectievelijk SPL en Volt. Dit hebben we per meetset gedaan met behulp van in het lab uitgevoerde ijkmetingen. Hierdoor zijn we de ongewenste frequentie-afhankelijke verzwakking/versterking van de microfoon en de rest van de opname-apparatuur kwijt. Het resultaat is de werkelijke geluidsdruk ten gevolge van het omgevingslawaai op de schouder van de crewchief en het werkelijke elektrische communicatiesignaal naar de CEP.

Maat voor geluidniveau

Vervolgens moeten we de geluidniveaus bepalen. Vaak wordt het gemiddelde A-gewogen niveau over een bepaalde tijd gemeten. Dit is handig als werknemers zich gedurende langere tijd in een omgeving bevinden met min of meer constant lawaai, bijvoorbeeld tijdens vervoer in een helikopter. De totale geluidenergie 'uitsmeren' (energetisch middelen) over 8 uur geeft het A-gewogen equivalente geluidniveau gedurende 8 uur, $L_{Aeq,8h}$. In de Arbo-wet is geregeld dat het A-gewogen equivalente geluidniveau waaraan werknemers gedurende een 8-urige werkdag worden blootgesteld niet hoger mag zijn dan 80 dB. Wordt deze grens overschreden dan mag de werknemer niet gedurende de gehele werkdag aan het lawaai worden blootgesteld. Er kan in dit geval worden berekend hoe lang de werknemer zich in het lawaai mag bevinden; per 3 dB toename van het niveau (verdubbeling van de akoestische energie) moet de expositieduur worden gehalveerd. Echter, bij onze metingen betreft het lawaai dat varieert in niveau (of eigenlijk varieert vooral de afstand van de crewchief tot de geluidsbron, maar dat komt op hetzelfde neer). Bovendien willen we verscheidene metingen met verschillende duren vergelijken. Dan is het gemiddelde niveau of $L_{Aeq,8h}$ niet praktisch.

Daarom gebruiken wij de *sound exposure level*, SEL. De SEL is de som van de geluid-energie gedurende een lawaaierige gebeurtenis of bezigheid, met een referentieduur van 1 seconde, in dB. Vaak wordt de SEL omschreven als het geluidniveau dat in één seconde dezelfde totale geluidenergie oplevert als de werkelijke gebeurtenis. Doordat de SEL een referentieduur van 1 seconde heeft, zijn verschillende bijdragen gemakkelijk samen te voegen door de SELs energetisch te sommeren. Voor het communicatiesignaal wordt hetzelfde gedaan met de elektrische energie in plaats van geluidenergie, resulterend in een elektrisch niveau (dBV). Strikt genomen is dit geen SEL, maar voor de eenvoud van analogie noemen we het wel zo.

A-weging

Op de octaafbandniveaus in SEL werd vervolgens een A-weging toegepast om rekening te houden met de frequentie-afhankelijke gevoeligheid van het menselijk gehoor.

Geluidniveau nabij de gehoorgang

Om de bijdrage van het omgevingslawaai tot de totale expositie nabij de gehoorgang te verkrijgen werd, per octaafband, de demping van de gehoorbescherming verdisconteerd. Om de bijdrage van de communicatie via CEP te verkrijgen werd, wederom per octaafband, het elektrische niveau omgezet naar equivalent geluidniveau door gebruik te maken van de omrekenfactor bepaald in hoofdstuk 3.

Energetisch sommeren van de octaafbanden geeft de *A-weighted sound exposure level*, $ASEL$, nabij de gehoorgang voor het omgevingslawaai, $ASEL_{\text{beschermd}}$, en de communicatie, $ASEL_{\text{communicatie}}$.

In formule vorm:

$$ASEL_{\text{beschermd}} = \Sigma (SEL_{\text{mic}} + A - D)$$

$$ASEL_{\text{communicatie}} = \Sigma (SEL_{\text{cep}} + A + V)$$

Met:

SEL_{mic} de geijkte octaafbandniveaus van het buitenlawaai (dB SPL).

SEL_{cep} de geijkte octaafbandniveaus van het communicatiesignaal (dB μV).

A de A-weging (dB).

D de demping van de combinatie van headset en CEP oordop, APV-waarden (dB), bepaald in hoofdstuk 4.

V de omrekening van μV naar SPL, gemiddelde + één keer de standaarddeviatie (dB), bepaald in hoofdstuk 3.

Σ energetische som: $10^{10} \log(10^{x/10} + 10^{y/10} + \dots)$.

De totale geluidsexpositie gedurende de bezigheid, $ASEL_{\text{totaal}}$, is de energetische som van $ASEL_{\text{beschermd}}$ en $ASEL_{\text{communicatie}}$.

Som van alle geluidexposities op een dag

Ten slotte kan de totale geluidbelasting ten gevolge van meerdere werkzaamheden op een dag, $ASEL_{\text{dag}}$, simpelweg worden bepaald door alle $ASEL$ s energetisch te sommeren, ongeacht de duur van de werkzaamheden (daarom gebruiken we juist de $ASEL$).

$L_{Aeq, 8h}$, de energetische middeling van het geluid over de werkdag, kan uit de $ASEL$ worden verkregen door

$$L_{Aeq, 8h} = ASEL_{\text{dag}} - 10^{10} \log(8 \cdot 60 \cdot 60)$$

$$= ASEL_{\text{dag}} - 44,6$$

Waarbij $8 \cdot 60 \cdot 60$ het aantal seconden in een 8-urige werkdag is.

6.2 Resultaten

In tabel 5 staan de resultaten voor de opnamen op Vliegbasis Volkel. Zowel de $ASEL$ van de totale geluidbelasting per opname ($ASEL_{\text{totaal}}$) als de afzonderlijke bijdragen van het buitenlawaai na demping door gehoorbescherming ($ASEL_{\text{beschermd}}$) en communicatie via CEP ($ASEL_{\text{communicatie}}$) worden gegeven. Ter vergelijking wordt ook de $ASEL$ van het buitenlawaai zonder gehoorbescherming ($ASEL_{\text{buiten}}$), dat wil zeggen, $D=0$ voor elke octaafband, gegeven. Aangezien er tijdens een recovery geen radiocontact is tussen piloot en crewchief en er dus geen bijdrage is van de communicatie op de totale

geluidbelasting, zijn de desbetreffende velden leeg. Zoals eerder vermeld kan $L_{Aeq,8h}$ uit ASEL worden verkregen door er 44,6 dB van af te trekken. Bedenk wel dat hierbij wordt aangenomen dat de werkzaamheden tijdens de betreffende opname de enige geluidbelastende werkzaamheden gedurende de 8-urige werkdag is.

Tabel 5 Geschatte geluidsexpositie per geluidsoopname. Zowel de ASEL van de totale geluidbelasting ('totaal') als de afzonderlijke bijdragen van het buitenlawaai na demping door gehoorbescherming ('beschermd') en communicatie via CEP ('communicatie') zijn weergegeven. Ook geeft de tabel van het buitenlawaai (bij afwezigheid van gehoorbescherming) de ASEL en het maximale A-gewogen niveau geïntegreerd over 1 seconde.

Label	Max dB(A) 1s buiten	ASEL buiten	ASEL beschermd	ASEL communicatie	ASEL totaal
L1	131,8	152,3	116,6	113,9	118,5
L2	130,1	150,8	115,1	113,2	117,3
L3	130,2	150,7	116,0	122,4	123,3
L4	127,1	148,2	114,6	110,7	116,1
L5	128,1	145,9	112,8	119,8	120,6
L6	127,3	146,7	113,6	121,6	122,3
L7	127,8	147,3	114,5	120,1	127,8
L8	128,2	147,2	114,3	113,2	116,8
L9	124,4	146,3	113,7	118,8	120,0
R1	131,5	140,6	104,1	-	104,1
R2	123,3	136,4	100,3	-	100,3
R3	118,3	133,3	97,3	-	97,3
R4	123,2	137,6	101,8	-	101,8
R5	127,7	140,9	105,3	-	105,3
R6	127,0	138,7	102,5	-	102,5

De gemiddelde geluidsexpositie ten gevolge van zowel het gedempte omgevingslawaai als de communicatie ($ASEL_{totaal}$ in tabel 5) tijdens een launch is 120,3 dB en de standaarddeviatie 3,7 dB. De gemiddelde geluidsexpositie en standaarddeviatie tijdens een recovery zijn 101,9 dB en 2,8 dB. Om de totale geluidsexpositie gedurende een gehele dag te bepalen, moeten de ASELs van alle activiteiten op een dag energetisch worden gesommeerd. We zullen uitgaan van de door ons berekende gemiddelde belasting. Normaal gesproken handelt een crewchief op één dag twee keer een launch & recovery af. Als we twee maal een gemiddelde launch en twee maal een gemiddelde recovery nemen dan resulteert dit in een totale expositieniveau over de gehele dag, $ASEL_{dag}$, van 123,4 dB. Door de 20 dB lagere geluidbelasting tijdens een recovery ten opzichte van werkzaamheden tijdens een launch, draagt deze eerste nauwelijks (slechts 0,1 dB) bij aan de totale geluidbelasting op een dag.

Een ASEL van 123,4 dB komt overeen met een $L_{Aeq,8h}$ van 79 dB. Dit is bijna gelijk aan de wettelijke maximale dagdosis van 80 dB [6]. Bedenk hierbij wel dat we bij de berekeningen uit zijn gegaan van redelijk veilige waarden. Om tot de totale geluidbelasting te komen hebben we bij de berekeningen aan het F-16 lawaai de APV als verzwakkingswaarden voor de gehoorbescherming genomen, oftewel de minimale verzwakking voor 84% van de populatie, en op een vergelijkbare wijze bij de berekeningen aan het niveau van de communicatie de gemiddelde correctiefactor van microvolt naar SPL plus één keer de standaarddeviatie.

De tweede kolom van tabel 5 geeft het maximale A-gewogen niveau, geïntegreerd over 1 s. Dat wil zeggen, per 1 seconde opname van het buitenlawaai is het gemiddelde niveau

bepaald en omgerekend naar dB(A) SPL en hiervan is de maximale waarde gedurende de gehele opname genomen. Dit komt overeen met de instelling A-slow op een standaard geluidsmeter, met dit verschil dat wij geen lopend gemiddelde hebben gebruikt maar de opname in stukjes van 1 seconde hebben geknipt en geen exponentiële maar lineaire weging hebben gebruikt. In [2] staan gemiddelde geluidniveaus die gemeten zijn op drie verschillende posities ten opzichte van de F-16 (metingen op Vliegbasis Volkel door de eigen Arbodienst). De positie 'buiten shelter rechts voor' leverde 'slechts' een niveau van 102 dB(A) op, 'shelter voor toestel' een niveau van 123 dB(A) en 'shelter links voor toestel' zelfs 127 dB(A). Extremen liepen op tot meer dan 130 dB(A). Dit komt zeer goed overeen met de maximale waarden die wij hebben gevonden bij werkzaamheden tijdens launches. In feite zijn de door ons gerapporteerde maximale waarden namelijk de extremen tijdens een complete launch, waarbij de crewchief zich op verschillende posities ten opzichte van de F-16 bevond.

6.3 Simulatie

Om een indicatie te krijgen van de juistheid van onze berekeningen, hebben we in het lab de situatie zoals opgenomen bij de dosismetingen gesimuleerd. Een gedeelte van een opname werd gebruikt om zowel het omgevingslawaaï van de F-16 te simuleren als de communicatie via de CEP. Met behulp van een aangepaste CEP met miniatuurmicrofoon hebben we het geluidniveau in de gehoorgang gemeten. In bijlage A staat de methode beschreven alsmede meetresultaten bij een kunsthoofd en bij enkele proefpersonen. De spreiding tussen verschillende proefpersonen is erg groot, vooral voor het geluid afkomstig van de CEP. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door geometrische verschillen tussen oren en de variatie in de positie van de CEP-dop met microfoon. De absolute geluidniveaus in de gehoorgang zeggen niet zo veel over de daadwerkelijke geluidbelasting, maar we kunnen wel het niveau in het oor als gevolg van de communicatie vergelijken met het niveau als gevolg van het omgevingslawaaï. Deze signaal-ruis-verhouding (SNR) bepaald bij het kunsthoofd wijkt behoorlijk af van de SNR die uit onze berekeningen komt. De gemiddelde SNR gemeten bij proefpersonen komt ondanks de grote spreiding in gemeten spectra in de gehoorgang wel aardig in de buurt. Zie bijlage A voor details. De resultaten maken in ieder geval duidelijk dat het lastig is om relevante metingen te verrichten in de gehoorgang.

7 Discussie en conclusie

Totale dagdosis

Er kan worden geconcludeerd dat, volgens verwachting, de communicatie een belangrijke factor is in de totale geluidsexpositie van F-16 crewchefs. Onze berekeningen aan de hand van metingen op Vliegbasis Volkel laten zien dat de geluidsexpositie als gevolg van de communicatie gemiddeld ongeveer 3 dB hoger is dan de geluidsexpositie als gevolg van het F-16 lawaai. Door de langere expositieduur en de aanwezigheid van communicatie tijdens launches dragen vooral deze bij aan de totale dagdosis. De geluidsexpositie tijdens recoveries spelen hierdoor nauwelijks een rol.

De totale dagdosis is bepaald aan de hand van twee keer vertrek en aankomst van een F-16. Er is dus aangenomen dat er verder geen lawaaibelasting plaats vindt. De dagdosis is dan 79 dB(A). De maximaal toegestane dagdosis van 80 dB(A) wordt dus net niet overschreden. Om een significante bijdrage te leveren aan de totale geluidbelasting op een dag moet het niveau van ander geluid hierbij in de buurt komen, bijvoorbeeld 2 uur lang 86 dB(A) of 5 minuten 100 dB(A) voor een verhoging van 2 dB. Aangezien de dagdosis al op een kritisch niveau ligt moet er worden opgepast met blootstelling aan ander geluid met hoge niveaus zoals tijdens onderhoudwerkzaamheden of schietoefeningen, maar ook bijvoorbeeld bij het beluisteren van mp3-spelers. Ook moet er uiterst voorzichtig worden omgegaan met het draaien van meer launches. Als een crewchief op één dag bijvoorbeeld 4 launches afhandelt in plaats van 2 (zoals gezegd dragen recoveries nauwelijks bij aan de totale geluidsexpositie), dan zal de dagdosis 3 dB hoger zijn. Dit zou gecompenseerd kunnen worden door de rest van de week minder launches af te handelen zodat de gemiddelde dagdosis op weekbasis de 80 dB(A) niet overschrijdt.

De geluidbelasting kan verlaagd worden door een headset te gebruiken die meer verzwakt of beter afsluit. Vooral voor de lage frequenties kan er nog winst worden behaald, wellicht doordat in de huidige situatie de Astrocom niet altijd geheel afsluit daar waar de draden van de CEPs de oorschelpen verlaten. Dat verklaart ook de hoge standaarddeviaties in de geluidverzwakkingen voor de laagste frequenties die wij hebben gemeten bij gebruik van Astrocom en CEP. Als een headset wordt gebruikt die het geluid beter dempt dan heeft dat niet alleen gevolgen voor het niveau in het oor ten gevolge van het omgevingslawaai, maar ook voor het niveau van de communicatie. Immers, de communicatie kan zachter worden gezet om dezelfde spraakverstaanbaarheid te houden. Daarnaast is het verstandig om, zover dat mogelijk is, de hoeveelheid communicatie tot het minimum te beperken.

Spraakverstaanbaarheid

Uit tabel 5 volgt dat het gemiddelde verschil in (A-gewogen) niveau van communicatie ten opzichte van omgevingslawaai, $ASEL_{communicatie} - ASEL_{beschermde}$, gelijk is aan 2,5 dB (met een bereik van -4 tot +8 dB). De duur⁵ van de communicatie tijdens launches is echter slechts ongeveer de helft van de duur van het lawaai van de F-16, om precies te zijn een factor 0,6. Dat betekent dat het werkelijke verschil tijdens communicatie ongeveer 2,3 dB hoger is en uitkomt op +4,8 dB. Echter, dit is bepaald aan de hand van overall niveaus en heeft daardoor geen directe relatie tot de spraakverstaanbaarheid.

⁵ De stiltes in het communicatiesignaal zijn niet meegenomen. De duur is bepaald door het signaal op te delen in frames van 20 ms, per frame de energie te bepalen en alleen die frames mee te tellen met een energieniveau hoger dan het gemiddelde min 14 dB.

Hierbij speelt namelijk onder andere de signaal-ruis-verhouding per frequentieband, de relevantie van iedere band tot spraakverstaanbaarheid, de bandbreedte en niveau-afhankelijke maskering een rol. Dit wordt allemaal meegenomen in de Speech Transmission Index (STI) [7,8]. Nemen we als testsignaal een gedeelte van een opname met relatief zachte communicatie (dezelfde als gebruikt voor simulatie, met een verschil in overall niveau tussen communicatie en F-16 lawaai van -1,8 dB, zie paragraaf 6.3) dan levert dat voor dit specifieke voorbeeld een STI van 0,33 op. Dit komt overeen met een 'effectieve A-gewogen signaal-ruis verhouding' van -5,1 dB oftewel een matige spraakverstaanbaarheid van losse bestaande woorden van ongeveer 65% [9]. Nemen we echter als testsignaal een gedeelte van een andere opname met relatief harde communicatie, met +8,4 dB niveauverschil tussen communicatie en F-16 lawaai, dan resulteert dat in een STI van 0,64, oftewel een goede spraakverstaanbaarheid van losse woorden van 95%. Dit zal ongeveer de range van spraakverstaanbaarheid zijn in onze opnamen.

Monotisch versus diotisch luisteren

Tijdens onze kalibratiemetingen in het lab werd er een vergelijking gemaakt tussen het geluid buiten, via open oor, en het geluid geproduceerd door de CEP in het ander oor. Omdat deze signalen alternerend werden aangeboden is er eigenlijk sprake van eenzijdige, oftewel monotische, aanbidding van het geluid. Bij gebruik van de CEP tijdens werkzaamheden zit er een CEP-dop in beide oren en wordt de spraak dus aan beide oren, oftewel diotisch, aangeboden. Alhoewel er een verschil in luidheid bestaat tussen monotisch en diotisch aangeboden geluid zal dit geen effect hebben op onze loudness matching. Immers, als beide te matchen geluiden (buitengeluid en CEP) diotisch zouden worden aangeboden dan zal voor beide geluiden de luidheid nagenoeg evenveel toenemen ten opzichte van monotisch luisteren. Er zal dus dezelfde relatie worden gevonden tussen elektrisch niveau op de CEP en equivalent geluidniveau buiten.

Samenvattend

Het is lastig een overtuigende methodiek te ontwikkelen om te bepalen wat de bijdrage is van communicatie via CEP aan de totale geluidbelasting; Meten in de gehoorgang is lastig, loudness matching is eleganter maar moeilijk voor de proefpersonen.

Gebruik makende van loudness matching en met de voorzichtigheid die we in acht hebben genomen bij onze berekeningen (gerekend met gemiddelde plus één keer standaard deviatie) komen we tot de volgende conclusies:

- De communicatie via CEP levert een belangrijke bijdrage aan de totale geluidexpositie van F-16 crewchiefs.
- De dagdosis bij twee keer afhandelen van launch en recovery van een F-16 is 79 dB(A).
- Aangezien dit dichtbij de maximaal toegestane dagdosis van 80 dB(A) zit is het aan te bevelen voorzichtig te zijn met het aantal werkzaamheden op één dag en in ieder geval (eventueel gemiddeld) niet meer dan twee launches per dag af te handelen. Een andere optie is een kap gebruiken die het geluid meer verzwakt dan die van de huidige headset.

Overigens kan de ontwikkelde methodiek ook worden ingezet om geluidsexpositie-metingen uit te voeren bij andere populaties CEP-gebruikers.

8 Referenties

- [1] Drullman, R.; Houben, M.M.J. & Geurtsen, F.W.M. (2006),
Meten van effectieve geluidbelasting achter gehoorbescherming,
(Rapport TNO-DV3 2006-M079), Soesterberg: TNO Defensie en Veiligheid.
- [2] Verhave, J.A. & Drullman, R. (2004),
*Geluidsverzwakking en spraakverstaanbaarheid van gehoorbeschermers met
geïntegreerde communicatie voor F-16 crewchiefs*, (Rapport TNO-TM-04-A036),
Soesterberg: TNO Defensie en Veiligheid.
- [3] ISO 4869-1: Acoustics – Hearing protectors – Part 1 (1990),
Subjective method for the measurement of sound attenuation,
Geneve, Zwitserland: International Standards Organization.
- [4] <http://www.cep-usa.com/id33.htm>
- [5] Damongeot, A.; Lataye, R. & Kusy, A. (1989),
An empirical formula for predicting the attenuation given by double hearing
protection (earplugs and earmuffs),
Applied Acoustics 28, 169-175.
- [6] Arbo-informatie AI-4 (2003),
Lawaai op de arbeidsplaats,
(Uitgave Min. SZW, 3^e herziene druk). Den Haag: SDU Uitgevers.
- [7] IEC 60268-16 3rd edition (2003),
*Sound system equipment. Part '16 : The objective rating of speech intelligibility by
the speech transmission method*,
Genève, Suisse.
- [8] Steeneken, H.J.M. & Houtgast, T. (1980),
A physical method for measuring speech-transmission quality,
Journal of the Acoustical Society of America 67, 318-326.
- [9] Steeneken, H.J.M. & Houtgast, T. (2002),
Validation of the revised STIr method,
Speech communication 38, 413-425.

9 Ondertekening

Soesterberg, maart 2008

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'A' followed by 'W. Bronkhorst' in a cursive script.

prof. dr. A.W. Bronkhorst
Afdelingshoofd

TNO Defensie en Veiligheid

A handwritten signature in black ink, featuring a large, stylized 'M' followed by 'M.J. Houben' in a cursive script.

dr. ir. M.M.J. Houben
Auteur

A Simulatie

Simulatie-omgeving

Uit een opname gemaakt op Vliegbasis Volkel hebben we een stuk van ongeveer 1 minuut met communicatie en F-16 lawaai geselecteerd. Dit gedeelte werd, na correctie voor de overdrachtkarakteristiek van de gebruikte opname apparatuur, gebruikt als testsignaal voor de simulatie. Het omgevingslawaai van de F-16 werd nagebootst door roze ruis te filteren en af te spelen in de galmkamer. Zo werd er een diffuus geluidsveld gegenereerd met nagenoeg hetzelfde spectrum als het opgenomen omgevingslawaai van het gecorrigeerde testsignaal. Omdat in de kamer het werkelijke niveau (122,8 dB(A) SPL voor dit testsignaal) niet kon worden geproduceerd werd het niveau met 20 dB verlaagd. Het opgenomen signaal naar de CEP werd weer via CEP afgespeeld. Ook nu werd eerst door middel van een inverse filter de filtering door de voorversterker, die in de opname zit, teniet gedaan. Daardoor werd in het lab exact hetzelfde signaal op de CEP verkregen als in de echte situatie op Vliegbasis Volkel voor het desbetreffende testsignaal⁶. Aangezien het niveau van het omgevingslawaai werd gesimuleerd met 20 dB verzwakking, is het elektrische niveau op de CEP ook met 20 dB verminderd.

Aanvankelijk was de wens om geluidniveaus in de gehoorgang te meten. Echter, het geluidniveau in het afgesloten oor kan door opslingeren van bepaalde frequenties aardig afwijken van het niveau in het vrije veld. Bovendien zal de exacte positie van de microfoon in de gehoorgang van invloed zijn op het gemeten niveau. Daarom zeggen de absolute geluidniveaus in de gehoorgang niet zo veel over de daadwerkelijke geluidbelasting. We kunnen echter wel een vergelijking maken tussen het niveau in het oor als gevolg van de communicatie (CEP) en het niveau als gevolg van het omgevingslawaai (F-16). Deze signaal-ruis-verhouding (SNR) kunnen we vergelijken met de SNR die uit onze berekeningen komt. Voor het testsignaal geven onze berekening een $ASEL_{\text{bescherm}}^{\text{d}}$ van 105,6 dB en een $ASEL_{\text{communicatie}}$ van 103,8 dB, oftewel een 'A-gewogen SNR' van -1,8 dB⁷. De toevoeging 'A-gewogen' is om te benadrukken dat de energetische som van de A-gewogen niveaus per frequentieband is gebruikt.

Om het geluidsniveau achter de oordop (dus in het afgesloten deel tussen dop en trommelvlies) te verkrijgen hebben we een CEP (een van de twee per set) uitgerust met een miniatuurmicrofoon. Een Knowles FG-3329 microfoon (4 mm lang, 2 mm doorsnede) werd geplaatst vlak bij de uitgang van de CEP, in de richting van de gehoorgang en ietwat uit het midden. De draad van de microfoon liep via het schuimgedeelte van de dop. De gemodificeerde CEP-dop kan in de gehoorgang worden geplaatst. Door de aanwezigheid van de miniatuurmicrofoon is de dop oncomfortabel om te dragen en kan het schuimgedeelte niet worden vervangen. Bovendien bleek het bij sommige proefpersonen lastig om de dop dusdanig in het oor te plaatsen dat de microfoon zich mooi in de gehoorgang bevond, vrij van de gehoorgangwand. Controlemetingen bij een kunsthoofd (hieronder beschreven) lieten geen verschil in trommelvliesniveau zien tussen het gebruik

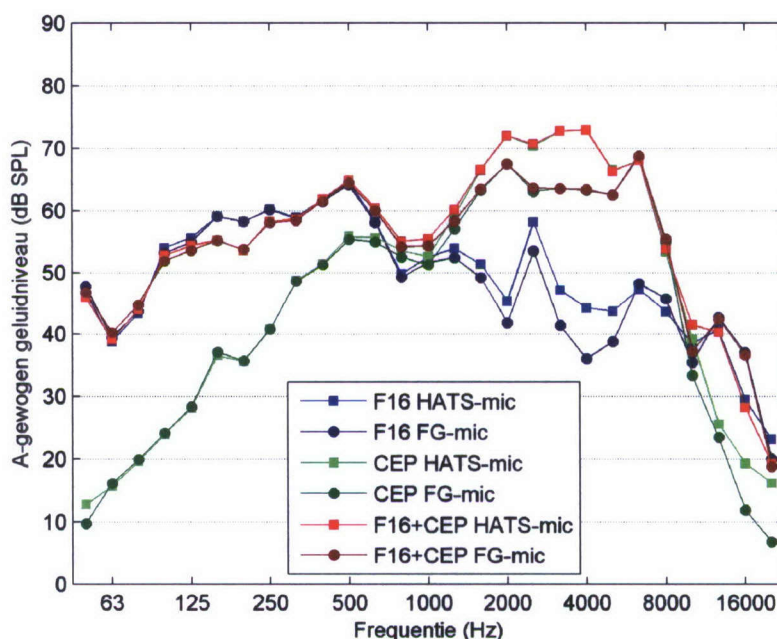
⁶ Als een ander CEP-type gebruikt gaat worden, zullen idealiter nieuwe opnamen moeten worden gemaakt tijdens het gebruik door crewchefs. Want dan verkrijgt je het echte spanningssignaal op de CEP. Het is niet correct om een opname gemaakt bij het huidige CEP-type te gebruiken om het geluidniveau te bepalen bij een nieuwe CEP. In de echte situatie waarbij de CEP, eventueel via een limiter, is aangesloten op de F-16 zal namelijk hetzelfde ingangsprakniveau een ander voltage over de CEP opleveren. Bovendien zal de gebruiker omwille van de spraakverstaanbaarheid en het comfort het niveau bijregelen.

⁷ Omdat het voor de simulatie geselecteerde stuk continu spraak bevat is er geen verschil in duur tussen spraak en F-16 lawaai en hoeft hier dus ook niet voor te worden gecompenseerd.

van een originele CEP en het gebruik van de gemodificeerde CEP (met microfoon). Dat betekent dat de toegevoegde microfoon het niveau bij het trommelvlies niet beïnvloedt.

Metingen bij een kunsthoofd

Met behulp van de gemodificeerde CEP en de hierboven beschreven simulatie-omgeving, hebben we metingen uitgevoerd bij een kunsthoofd (Head Acoustics HATS II.3). Om de lengte van het oorkanaal van de HATS niet te beïnvloeden (wat de akoestische impedantie zou veranderen) hebben we een speciaal gemaakte 'oor adapter' gebruikt. Deze adapter, gemaakt van siliconen, paste in de oorschelp van de HATS en diende als overgang tussen oordop van de CEP en het oorkanaal van de HATS. Op deze manier bevond de voorkant van de in het kunstoor geplaatste oordop zich ongeveer bij de originele ingang van het oorkanaal van de HATS. Tijdens de simulatie droeg het kunsthoofd naast de (gemodificeerde) CEP een Astrocom headset, net zoals de crewchefs op Vliegbasis Volkel. Naast het geluidniveau achter de CEP-dop, gemeten door de miniatuurmicrofoon, hebben we ook de beschikking tot het geluidniveau bij het trommelvlies, gemeten door de trommelvliesmicrofoon in het kunsthoofd.



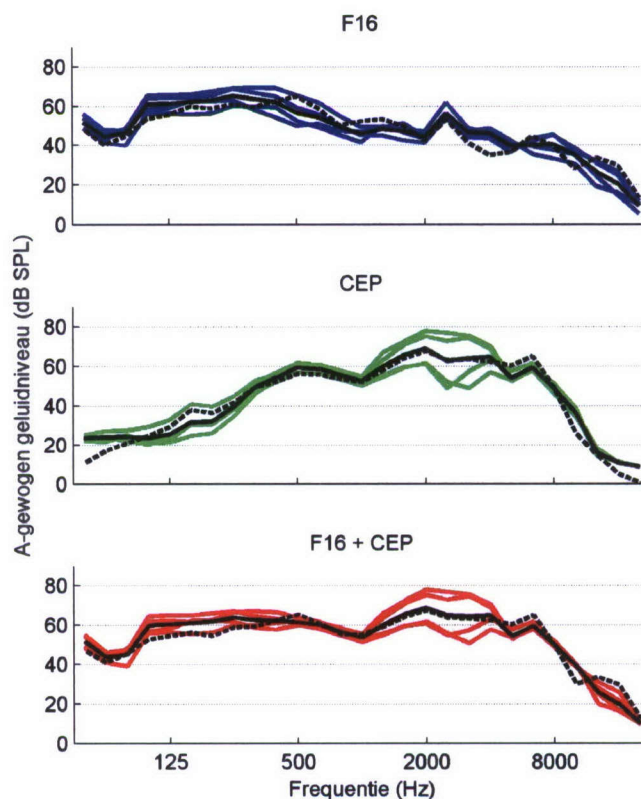
Figuur A.1 Resultaten van de simulatie bij het kunsthoofd. Het geluidniveau is gemeten met zowel de trommelvliesmicrofoon van de HATS ('HATS-mic') als met de microfoon van de gemodificeerde CEP ('FG-mic'). Er is bij drie condities gemeten: alleen omgevingslawaai van de F-16 ('F16'), alleen communicatie ('CEP') en beide tegelijk ('F16+CEP').

De A-gewogen spectra zijn weergegeven in figuur A.1. De spectra gemeten met de trommelvliesmicrofoon van de HATS (in de figuur weergegeven met vierkante markers) en de microfoon van onze gemodificeerde CEP (cirkels) lijken tot 1 kHz sterk op elkaar. In het gebied van 1 tot 6 kHz zijn de niveaus gemeten bij het trommelvlies een stuk hoger dan die dicht bij de CEP-dop, tot wel 10 dB. In dit gebied is het geluidniveau van de communicatie (groene lijnen) hoger dan het niveau van het gedempte omgevingslawaai (blauw) en draagt het omgevingslawaai niet meer bij aan het totale niveau van omgevingslawaai plus communicatie (rood); de communicatie bepaalt hier dus volledig het totale niveau. Deze dominantie van het communicatiesignaal zien we ook terug in de overall A-gewogen niveaus gemeten bij het trommelvlies: 70,2 dB, 79,1 dB en 79,6 dB voor respectievelijk omgevingslawaai, communicatie en beide. De meting met de

gemodificeerde CEP resulteert in respectievelijk 69,7 dB, 74,0 dB en 75,1 dB. Hieruit volgt een 'A-gewogen SNR' van 8,9 dB bij het trommelvlies en 4,3 dB bij de CEP-dop. Het verschil, dat hoofdzakelijk het gevolg is van de grote verschillen bij communicatiegeluid, wordt mogelijk veroorzaakt door de verschillende posities van de microfoons in de gehoorgang.

Metingen bij proefpersonen

We hebben ook bij enkele proefpersonen het geluidniveau in de gehoorgang gemeten. Er werd dezelfde simulatie-opstelling gebruikt als bij de metingen aan het kunsthoofd. Ook nu werd de gemodificeerde CEP met microfoon gebruikt in combinatie met een Astrocom headset. In figuur A.2 staan de resultaten voor vier verschillende oren (afkomstig van drie proefpersonen).



Figuur A.2 Resultaten van de simulatie bij proefpersonen. Het geluidniveau is gemeten met de microfoon van de gemodificeerde CEP. Er is bij drie condities gemeten: alleen omgevingslawaai van de F-16 ('F16'), alleen communicatie ('CEP') en beide tegelijk ('F16+CEP'). Doorgetrokken gekleurde lijnen geven de A-gewogen spectra per gemeten oor, doorgetrokken zwarte lijnen het gemiddelde over de oren. Ter vergelijking geven de onderbroken zwarte lijnen de A-gewogen spectra gemeten met behulp van de CEP met microfoon bij een kunsthoofd.

De spreiding is erg groot, vooral voor het geluid afkomstig van de communicatie in het gebied van 1 tot 5 kHz. Dit komt waarschijnlijk door de geometrische verschillen tussen oren en de variatie in de positie van de CEP-dop, en dus de microfoon, die hier het gevolg van zijn. Gezien de variatie over de gemeten oren valt het verschil in spectrum tussen het gemiddelde van de oren (doorgetrokken zwarte lijn) en het kunsthoofd (onderbroken zwarte lijn) mee. De 'A-gewogen SNR' van de communicatie ten opzichte van het omgevingslawaai bepaald aan de hand van de gemiddelde spectra is 1,7 dB. Dit is wat hoger dan wat uit onze berekeningen komt (-1,8 dB), maar gezien de grote spreiding in gemeten spectra in de gehoorgang komt het aardig in de buurt.

ONGERUBRICEERD
REPORT DOCUMENTATION PAGE
(MOD-NL)

1. DEFENCE REPORT NO (MOD-NL) TD2008-0020	2. RECIPIENT'S ACCESSION NO -	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO TNO-DV 2008 A054
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO 032.13072	5. CONTRACT NO -	6. REPORT DATE March 2008
7. NUMBER OF PAGES 28 (incl 1 appendix, excl RDP & distribution list)	8. NUMBER OF REFERENCES 9	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final
10. TITLE AND SUBTITLE Sound exposure level of F-16 crew chiefs using communications earplugs		
11. AUTHOR(S) Dr M.M.J. Houben, MSc; J.A. Verhave; F.W.M. Geurtsen		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Defence, Security and Safety, P.O. Box 23, 3769 ZG Soesterberg , The Netherlands Kampweg 5, 3769 DE, Soesterberg, The Netherlands		
13. SPONSORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) Dutch Ministry of Defence, P.O. Box 20701, 2500 ES, The Hague, The Netherlands		
14. SUPPLEMENTARY NOTES The classification designation Ongerubriceerd is equivalent to Unclassified, Stg. Confidentieel is equivalent to Confidential and Stg. Geheim is equivalent to Secret.		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS (1044 BYTE)) For communication in noisy environments, communications earplugs (CEPs) are increasingly used. CEPs are earplugs that incorporate a miniature speaker through which communication can be presented to the user unattenuated while the earplugs do attenuate environmental sounds. To assess the sound exposure level of CEP users, not only environmental sounds should be taken into account, but also the sound exposure resulting from communication through the CEP. For this, a measurement method has been developed. It uses loudness matching to establish the relation between electric level to the CEP and perceived sound level. During activities, both the environmental noise and the electric signal to the CEP are recorded. The level of the environmental sounds, after attenuation by the hearing protection, is combined with the sound level produced by the CEP, which is determined from the electric level. This method is applied to F-16 crew chiefs at Air Base Volkel, a population that uses CEPs extensively in extremely noisy conditions. Our calculations show that communication through CEP significantly contributes to the sound exposure level of the crew chiefs. The estimated day dose, based on two launches and recoveries, is 79 dB(A), which is just below the maximum allowed level of 80 dB(A).		
16. DESCRIPTORS Noise exposure, Hearing protection, Sound exposure		IDENTIFIERS F-16 crewchiefs, Communications earplug,
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT) Ongerubriceerd	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE) Ongerubriceerd	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT) Ongerubriceerd
18. DISTRIBUTION AVAILABILITY STATEMENT Unlimited Distribution		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES) Ongerubriceerd

ONGERUBRICEERD

Distributielijst

Onderstaande instanties/personen ontvangen een volledig exemplaar van het rapport.

- | | |
|-------|---|
| 1 | DMO/SC-DR&D
standaard inclusief digitale versie bijgeleverd op cd-rom |
| 2/3 | DMO/DR&D/Kennistransfer |
| 4 | Projectbegeleider Defensie
Mindef/DS/CLSK/CML
Y. Steinman |
| 5/7 | Bibliotheek KMA |
| 8/9 | TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Soesterberg,
(Archief) |
| 10/15 | TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Soesterberg,
prof. dr. A.W. Bronkhorst
dr. ir. M.M.J. Houben (3)
F.W.M. Geurtsen
J.A. Verhave |

Onderstaande instanties/personen ontvangen het managementuittreksel en de distributielijst van het rapport.

4 ex.	DMO/SC-DR&D
1 ex.	DMO/ressort Zeesystemen
1 ex.	DMO/ressort Landsystemen
1 ex.	DMO/ressort Luchtsystemen
2 ex.	BS/DS/DOBBP/SCOB
1 ex.	MIVD/AAR/BMT
1 ex.	Staf CZSK
1 ex.	Staf CLAS
1 ex.	Staf CLSK
1 ex.	Staf KMar
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, Algemeen Directeur, ir. P.A.O.G. Korting
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, Directie Directeur Operaties, ir. C. Eberwijn
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, Directie Directeur Kennis, prof. dr. P. Werkhoven
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, Directie Directeur Markt, G.D. Klein Baltink
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Den Haag, Manager Waarnemingssystemen (operaties), ir. B. Dunnebie PDeng
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Den Haag, Manager Informatie en Operaties (operaties), ir. P. Schulein
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk, Manager Bescherming, Munitie en Wapens (operaties), ir. P.J.M. Elands
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk, Manager BC Bescherming (operaties), ir. R.J.A. Kersten
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Soesterberg, Manager Human Factors (operaties), drs. H.J. Vink